



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 198 17 664 A 1**

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 B 11/30**  
G 01 N 21/55  
G 01 N 21/88

21 Aktenzeichen: 198 17 664.3  
22 Anmeldetag: 21. 4. 98  
43 Offenlegungstag: 4. 11. 99

DE 198 17 664 A 1

71 Anmelder:  
Lehmann, Peter, Dr.-Ing., 28209 Bremen, DE

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE	44 08 226 C2
DE	41 05 509 C2
DE	44 00 868 A1
DE	35 32 690 A1
DE	30 37 622 A1
DE	30 20 044 A1
DE-OS	22 60 090
US	41 45 140
WO	86 04 676 A1

*this page blank (uspto)  
(oidsn) xubig egea*

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Vorrichtung zur Rauheitsmessung an technischen Oberflächen bei Beleuchtung mit einem Specklemuster

57 Verfahren und Vorrichtung zum schnellen Charakterisieren der Rauheit von optisch glatten Oberflächen, bei dem die betreffende Oberfläche mit einem Specklemuster, d. h. mit räumlich partiell kohärentem Licht, beleuchtet und das an der Oberfläche gestreute Licht unter Einhaltung der Fresnel-Näherung mit einer ein- oder zweidimensional örtlich auflösenden Anordnung photosensitiver Elemente aufgenommen wird.

In Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit zeigen die aufgezeichneten Intensitätsverläufe charakteristische Modulationseffekte, die nach vorangegangener Digitalisierung unter Verwendung eines Prozeßrechensystems mittels digitaler Signal- oder Bildverarbeitung quantifiziert werden. Beispielsweise eignet sich der Reziprokwert der "Breite" von Autokorrelationsfunktionen der Intensitätsverläufe als Maß für die Oberflächenrauheit, wobei die Rauheit in der Richtung charakterisiert wird, die mit der Projektion der jeweiligen Richtung des Intensitätsmusters, für die die Breite der Autokorrelationsfunktion ausgewertet wird, auf die untersuchte Oberfläche zusammenfällt. Durch Ermittlung des Grades der Intensitätsmodulation für unterschiedliche Oberflächenrichtungen und durch den Vergleich der resultierenden Auswerteergebnisse kann auch die Isotropie der Oberflächenrauheit beurteilt werden.

DE 198 17 664 A 1

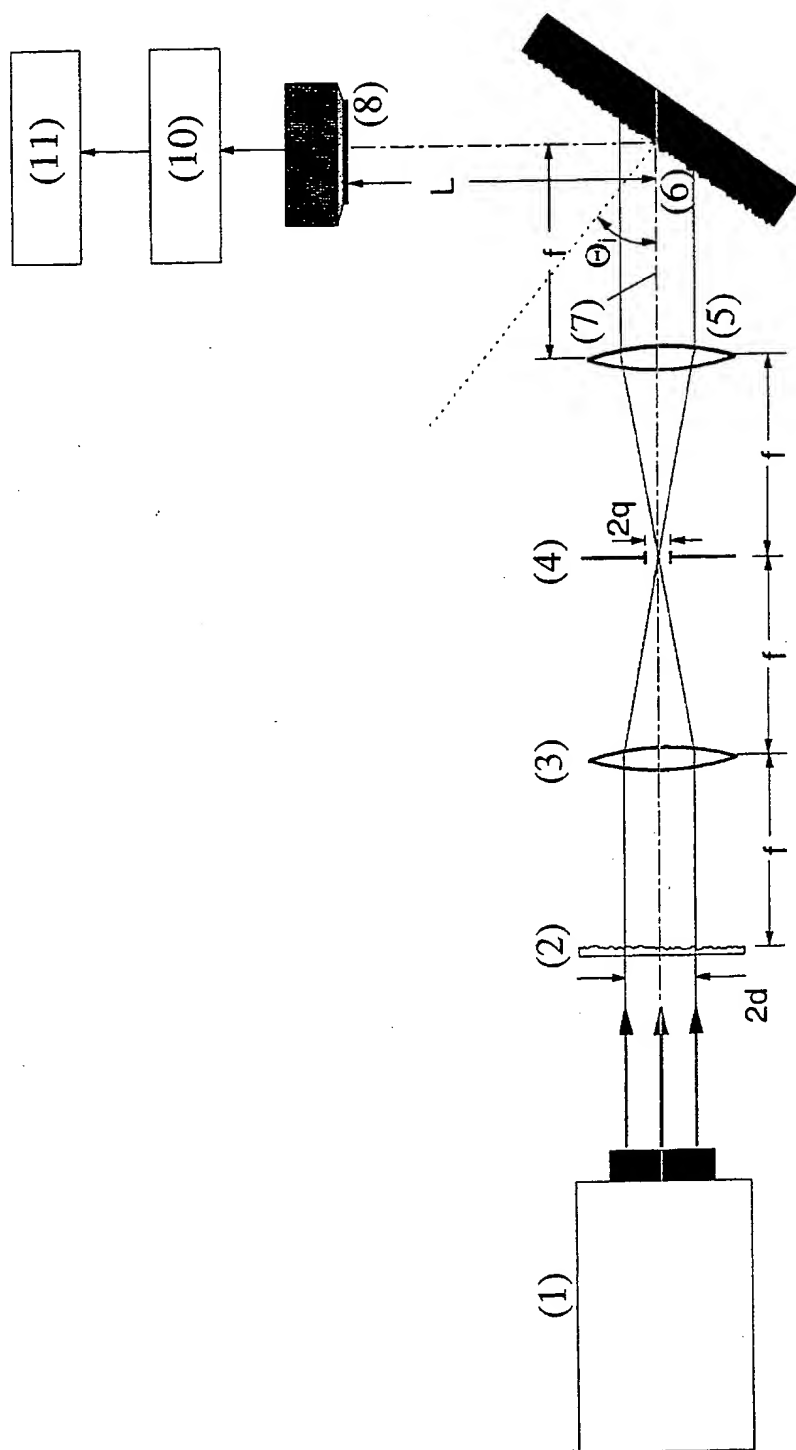


Fig. 1

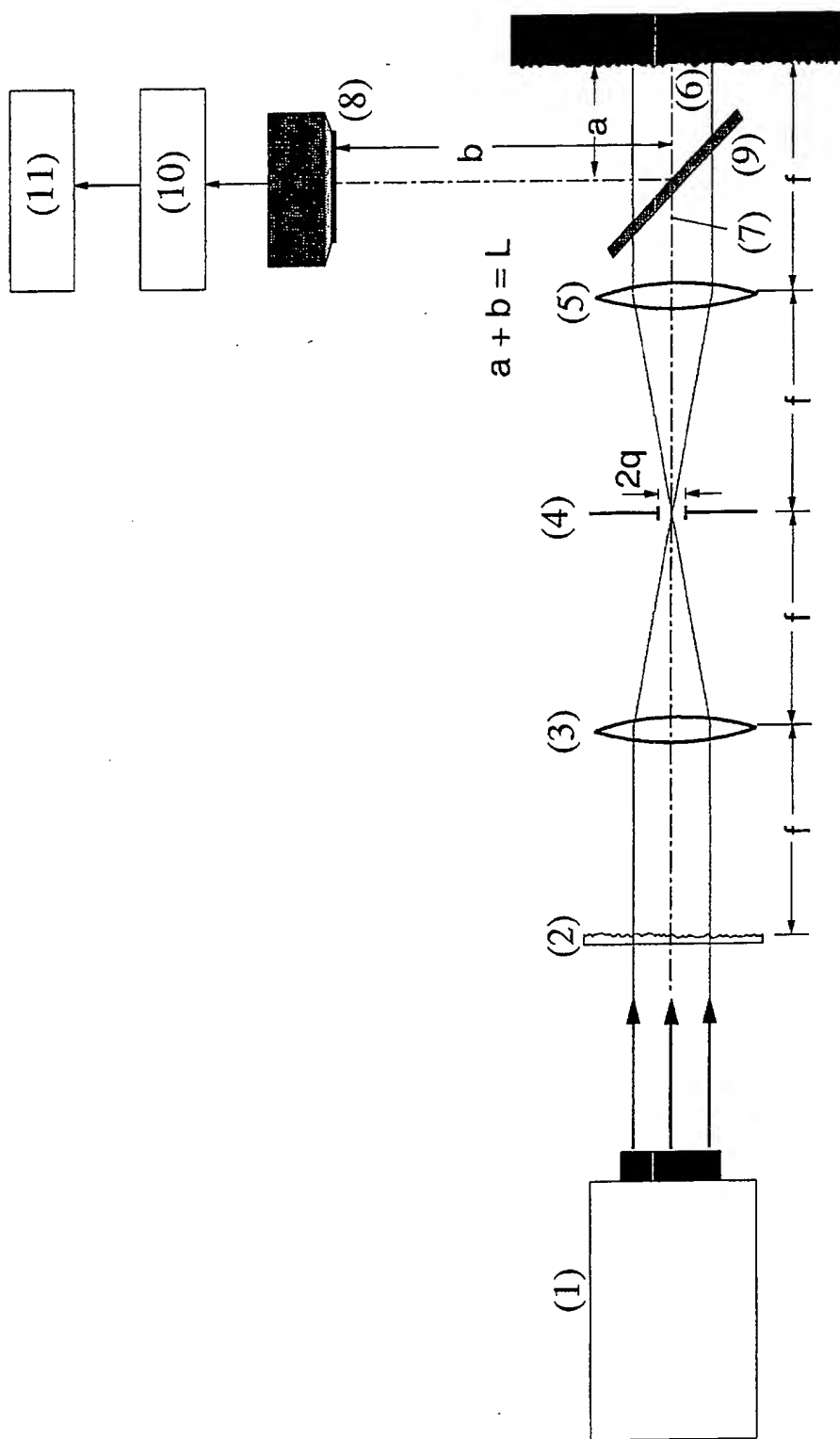


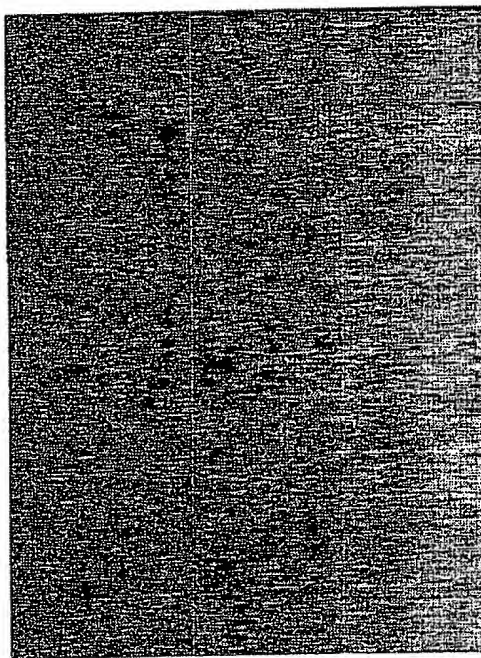
Fig. 2

~~Page Blank (uspio)~~

Fig. 3



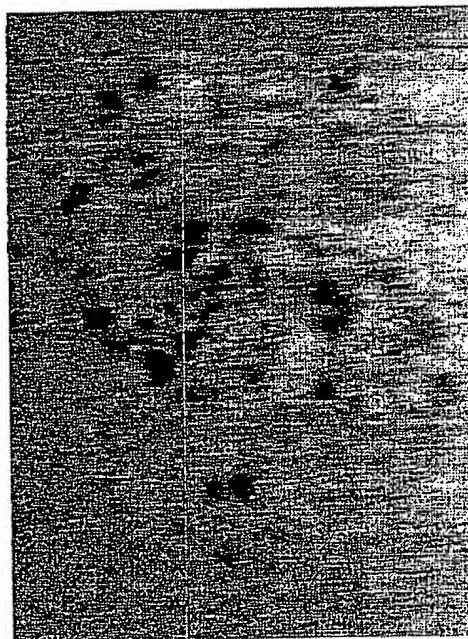
b)



d)



a)



c)

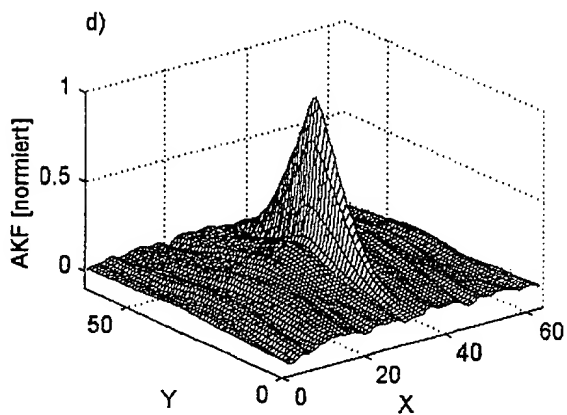
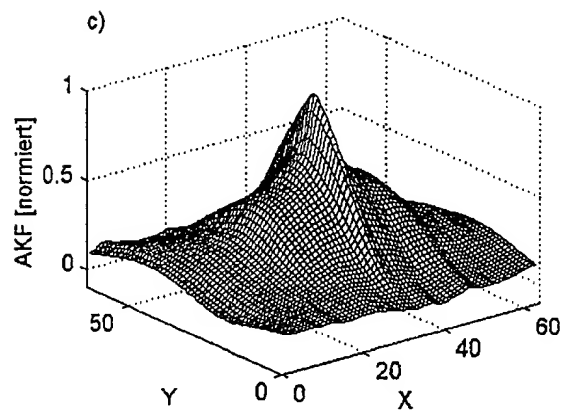
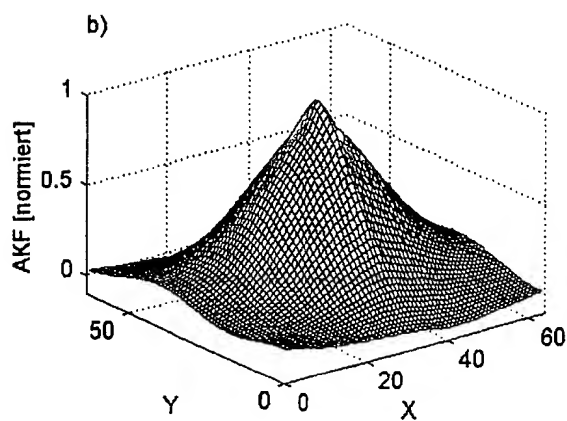
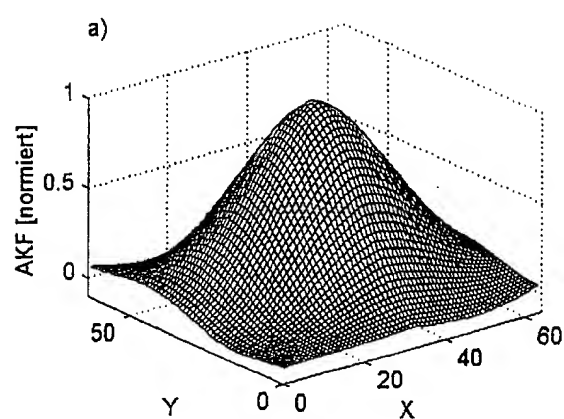


Fig. 4

Page blank (uspto)

Es wird ein Verfahren und eine Meßeinrichtung (Vorrichtung) zur prozeßgekoppelten Bestimmung der Rauheit technischer Oberflächen beschrieben, bei dem das zu untersuchende Oberfläche beleuchtende Licht räumlich teilkohärent ist und das an der Oberfläche gestreute Licht in der Fresnel-Region mittels eines Detektor-Arrays, d. h. entweder mit einer Detektorzeile oder mit einer zweidimensionalen Detektor-Matrix, detektiert wird. Das Bilddatensignal des Detektor-Arrays wird anschließend digitalisiert und mittels eines Bildverarbeitungsalgorithmus analysiert, indem für das gesamte Datenfeld oder Teile des Datenfeldes Werte der Autokorrelationsfunktion der Graustufendaten gebildet werden, die so zueinander in Beziehung gesetzt werden, daß eine Charakterisierung der Oberflächenmikrotopographie erreicht wird.

Bisher eingesetzte Meßverfahren der berührungslosen, parametrischen Rauheitsmessung sind in den Schriften DE-OS 22 60 090, DE 30 37 622 A1 und DE 41 05 509 C2 beschrieben. Diese Verfahren befassen sich mit der Erfassung und Auswertung von Winkelverteilungen des an der zu untersuchenden Oberfläche gestreuten Lichtes, wobei die eingestrahlen Lichtstrahlenbündel räumlich kohärent und im allgemeinen monochromatisch sind. Der Verlauf der mit einem solchen Verfahren detektierten Streulichtverteilungen hängt jedoch sowohl von einer Senkrechtkenngröße der Rauheit gemäß DIN 4762 als auch von einer Waagrechtkenngröße der Rauheit ab, so daß sich die Meßwerte für mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren produzierte Oberflächen nicht ohne weiteres vergleichen lassen. Die technische Ausführung derartiger Meßsysteme wird wesentlich dadurch beeinflußt, daß die bei optisch rauen Oberflächen auftretende diffuse Streustrahlung über einem ausreichend großen Winkelbereich erfaßt werden muß, so daß ein solches Meßsystem entweder in einem genügend kleinen Abstand vom Meßobjekt angeordnet werden muß, oder sich über einen entsprechend großen Raumwinkelbereich erstrecken muß, damit die Erfassung des relevanten Streuwinkelbereiches gegeben ist. Auch durch diese Einschränkung wird ein Einsatz einer derartigen Meßeinrichtung im laufenden Produktionsprozeß erschwert.

Der Lösung einer anderen Aufgabenstellung dient das in der Schrift WO 86/04676 A2 dargelegte Verfahren, und zwar der Ermittlung von Gestaltabweichungen niedriger Ordnung, beispielsweise von Unebenheiten. Dabei werden Verschiebungen des Schwerpunktes eines von einem Meßfleck auf einer Oberfläche reflektierten Lichtstrahlenbündels durch Auswertung der Ausgangssignale von zeilenförmig angeordneten Lichtempfangselementen erfaßt. Durch Abtasten der Oberfläche wird in Abtastrichtung ein Steigungs- oder Höhenprofil ermittelt, sofern die Abmessungen des Lichtflecks in Abtastrichtung nicht größer als die kleinsten aufzulösenden Gestaltsfehler sind.

Ein weiteres vergleichbares Meßverfahren ist in der Schrift DE 30 20 044 A1 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird zeitlich teilkohärentes Licht verwendet, wobei dem rückgestreuten Licht zusätzlich inkohärentes Licht überlagert wird. Durch die Verwendung von Zusatzlicht wird dieses Verfahren jedoch empfindlich gegenüber sonstigem Streulicht aus der Umgebung.

Ein anderes bekanntes Meßverfahren, das in der Schrift DE 35 32 690 A1 beschrieben wird, benötigt für die Umsetzung des Meßsignals in ein Rauheitssignal Kennlinien, die für die betrachtete Geometrie zunächst anhand von Prüfflächen bekannter Rauheit ermittelt werden müssen, so daß der Einsatz solcher Meßverfahren einen hohen Aufwand erfordert.

Eine Meßeinrichtung zur prozeßgekoppelten Bestimmung der Rauheit technischer Oberflächen, die ein polychromatisches Lichtstrahlenbündel erfordert, wird in der Schrift DE 44 08 226 C2 beschrieben. Als Folge der Winkeldispersion ergibt sich bei Beleuchtung rauher Oberflächen mit polychromatischem Licht der Effekt der Speckleelongation, dessen Ausprägung mit zunehmender Senkrechtkenngröße der Rauheit abnimmt. Die Breite lokaler Autokorrelationsfunktionen ändert sich infolge des Speckleelongationseffektes innerhalb eines Specklebildes. Diese Änderung wird zur Rauheitsmessung benutzt. Der Meßbereich solcher Meßeinrichtungen ist durch das Zustandekommen rein diffuser Lichtstreuung bedingt, die unter der Voraussetzung  $R_q > \lambda/4$  auftritt, wobei  $R_q$  gemäß DIN 4762 als quadratischer Mittenrauhwert definiert ist und mit  $\lambda$  die größte verwendete Lichtwellenlänge bezeichnet wird.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe einer prozeßgekoppelten Rauheitsmessung zugrunde, wobei der Meßbereich  $R_q$ -Werte kleiner als  $\lambda/4$  zulassen und sich die Meßeinrichtung in für technische Belange ausreichend großem Abstand zur Oberfläche befinden soll. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die zu untersuchende Oberfläche räumlich partiell kohärent, d. h. mit einem Specklemuster, auch Granulationsmuster genannt, beleuchtet wird, das dann an der zu vermessenden Oberfläche gestreut wird. Die Winkelverteilung des auf diese Weise erzeugten Streulichtes ist neben der Abhängigkeit von der Intensitätsverteilung des eingestrahlen Specklemusters von den statistischen Parametern der rauen Oberfläche und weiteren Parametern der optischen Anordnung abhängig. Die Winkelverteilung des Streulichtes weist starke Intensitätsfluktuationen auf, die im Fernfeld das zu detektierende Specklemuster bilden. Die Feinstruktur eines solchen Specklemusters wird auf charakteristische Weise von der Oberflächenrauheit beeinflusst, so daß sich z. B. der quadratische Mittenrauhwert  $R_q$  ermitteln läßt. Die Meßwerte hängen nahezu ausschließlich von der gewünschten Senkrechtkenngröße ab und geben nicht etwa lediglich eine nicht trennbare Überlagerung verschiedener Einflüsse bzw. Oberflächenparameter an.

Zur Lösung der erfindungsgemäßen Aufgabe werden die Specklebilder mittels eines Detektor-Arrays detektiert, d. h. mit einer linearen oder einer flächigen Anordnung einer Vielzahl fotosensitiver Elemente, die so beschaffen sein muß, daß die Specklestrukturen, des Specklemusters aufgelöst werden. Dabei werden die Bilddaten der Aufnahme, die entweder die Speckleintensitäten entlang einer Linie oder die beobachteten Specklemuster in ihrer flächigen Anordnung wiedergeben, digitalisiert und als Graustufensignale oder -bilder in einem Datenspeicher abgelegt. Mittels digitaler Bildverarbeitung werden ein- oder zweidimensionale Autokorrelationsfunktionen der aus den aufgenommenen Graustufendaten ermittelten Intensitätsfluktuationen gebildet. Diese Intensitätsfluktuationen erhält man, indem von den aufgenommenen Bild- oder Signalwerten, die im allgemeinen in einem näherungsweise linearen Zusammenhang zu den Speckleintensitäten stehen, Mittellinien oder -flächen, beispielsweise in Form von Mittelwerten, Regressionsgeraden oder -flächen, subtrahiert werden. Für die resultierenden Autokorrelationsfunktionen wird auf einheitliche Art und Weise mindestens eine charakteristische Breite numerisch ermittelt, die z. B. durch den Nulldurchgang einer sich dem absoluten Maximum der Autokorrelationsfunktion asymptotisch nähernden Näherungsparabel gekennzeichnet sein kann. Im Falle der Bildung zweidimensionaler Autokorrelationsfunktionen wird z. B. der Nulldurchgang der Näherungsparabel in der Richtung des kleinsten Abstands zwischen Parabelnullobergang und der Position des Maxi-

mums der Autokorrelationsfunktion als charakteristische Breite verwendet.

Bei der erfindungsgemäßen Meßeinrichtung stellt die Abnahme der charakteristischen Breite mit zunehmender Rauheit den Meßeffect dar, so daß z. B. der Reziprokwert einer solchen Breite als Maß für eine Senkrechtkenngröße der Rauheit verwendet werden kann. Je kleiner die Senkrechtkenngröße der Rauheit ist, desto größer ist die charakteristische Breite der Autokorrelationsfunktion.

Bezüglich der Eigenschaften des Materials der streuenden Oberfläche ist lediglich vorauszusetzen, daß das Material ein für die Messung ausreichendes Reflexionsvermögen zeigt.

Vorteile des erfindungsgemäßen Meßverfahrens im Vergleich zu bisher bekannten optischen Rauheitsmeßeinrichtungen und -verfahren bestehen vor allem in der großen Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Rauheit der zu untersuchenden Oberfläche und der hohen Reproduzierbarkeit der Meßwerte. Da es sich um ein berührungsloses, optoelektronisches Meßverfahren handelt, bei dem während des Meßvorgangs keine mechanischen Komponenten bewegt werden müssen, ist die reine Meßzeit ausgesprochen kurz, so daß Messungen auch an schnell bewegten Oberflächen durchgeführt werden können.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß Intensitätsschwankungen analysiert werden, während bei anderen Meßeinrichtungen eine Auswertung von Absolutwerten der Intensität erforderlich ist.

Besonders hervorzuheben ist auch die geringe Anfälligkeit der Meßeinrichtung gegen die Justierungsanauigkeit: Verkippungen der rauen Oberfläche aus der justierten Position heraus von  $1^\circ$  und mehr beeinträchtigen das Ergebnis der Rauheitsmessung nicht.

Vorteilhaft ist ferner, daß Abstände zwischen der zu untersuchenden Oberfläche und der Meßeinrichtung von mehreren Zentimetern problemlos zu realisieren sind.

Schließlich kann der Meßaufbau im Vergleich zu den bekannten optischen Verfahren sehr kompakt und kostengünstig ausgeführt werden.

Zur Realisierung einer erfindungsgemäßen Meßeinrichtung können konventionelle optische Komponenten, Laserdioden und CCD-Technik verwendet werden. Die erfindungsgemäße Meßeinrichtung bietet gute Voraussetzungen für einen Einsatz im laufenden Produktionsprozeß. Entscheidend für die Charakterisierung schnell bewegter Oberflächen ist dabei die minimal mögliche Verschlusszeit des Detektorarrays oder die Dauer der Oberflächenbeleuchtung mit dem Specklemuster. Beide Zeitkonstanten können bei Verwendung von elektronischen Standardbauteilen  $10 \mu\text{s}$  und weniger betragen, so daß Bewegungsgeschwindigkeiten der untersuchten Oberflächen bis zu einigen Hundert m/Min. zu keiner Beeinträchtigung der Meßergebnisse führen. Ein Vorteil der zeilenförmigen Detektoranordnung besteht darin, daß die Meßdatenaufnahme und -auswertung für einen beleuchteten Oberflächenbereich erheblich schneller erfolgen kann als im Falle der zweidimensionalen Detektoranordnung, so daß selbst bei sehr schnell bewegten Objekten die Oberflächenqualität kontinuierlich überprüft werden kann.

Weitere Einzelheiten, Merkmale und Vorteile ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung einer schematisch gezeichneten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens. **Abb. 1** zeigt eine Lichtquelle (1) ausreichender Kohärenz (z. B. Argon-Ionen-Laser, Helium-Neon-Laser oder Halbleiterlaser) unter Umständen mit einer nachfolgenden Strahlaufweitungsoptik zur Erzeugung eines Lichtstrahlenbündels mit einem Durchmesser  $2d$ , der z. B. 4 mm betragen

kann. Das Strahlenbündel trifft auf eine Diffuserplatte (2), die z. B. die Form einer Mattglasscheibe haben kann, und wird an dieser gestreut. Die Diffuserplatte wird z. B. mittels einer sogenannten 4f-Optik auf den zu untersuchenden Oberflächenbereich des Meßobjektes (6) abgebildet. Die 4f-Optik besteht aus zwei Konvexlinsen der Brennweite  $f$ , die so angeordnet sind, daß sich in der vorderen Brennebene der ersten Linse (3) die Diffuserplatte befindet, in der hinteren Brennebene der ersten Linse eine Lochblende (4) mit einer kreisförmigen Öffnung des Durchmessers  $2q$ , die ihrerseits in der vorderen Brennebene der zweiten Konvexlinse (5) positioniert ist, deren hintere Brennebene die Bezugsebene der zu vermessenden Oberfläche (6) auf der optischen Achse (7) des Meßsystems schneidet. Diese Anordnung dient einer optischen Tiefpaßfilterung des auf die zu vermessende Oberfläche abgebildeten Objektes, d. h. der Diffuserplatte. Über den Öffnungsdurchmesser  $2q$  kann die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters und damit die mittlere Specklegröße des Beleuchtungsspecklemusters, das auf die Oberfläche (6) fällt, vorgegeben werden. Das an der zu untersuchenden Oberfläche gestreute Specklemuster wird in der Beobachtungsebene mit einem zeilenförmigen oder flächigen Detektorarray (8) detektiert, das sich im Abstand  $L$  zur Oberfläche in der geometrischen Reflexionsrichtung befindet. Der Abstand  $L$  ist so groß zu wählen, daß die Fresnel-sche Fernfeld-Näherung Gültigkeit besitzt.

Im Ausführungsbeispiel gemäß **Abb. 1** schließt die optische Achse mit der Oberflächen normale der Bezugsebene der untersuchten Oberfläche den Winkel  $\Phi_1$  ein, der z. B.  $15^\circ$  betragen kann. Selbstverständlich kann zur Realisierung des erfindungsgemäßen Meßverfahrens auch eine Anordnung mit senkrechtem Lichteinfall ( $\Phi_1 = 0^\circ$ ) gewählt werden, wie sie beispielhaft in **Abb. 2** dargestellt ist. Bei dieser Anordnung wird zusätzlich ein Strahlteiler (9) zur Umlenkung des Streulichtes verwendet.

Als flächige Detektormatrix läßt sich z. B. ein CCD-Array mit  $768 \times 576$  Pixeln verwenden. Bei einer Breite des CCD-Chips von 8,8 mm und einem Abstand  $L$  von 130 mm ergibt sich ein Winkel von ca.  $\pm 2^\circ$ , um den das Streulicht um die optische Achse des Meßsystems aufgenommen und zur Auswertung herangezogen wird. Die Bilddaten werden mittels einer Bilddatenerfassungseinheit (10) als Grauwerte abgelegt und digital in einem Rechner (11) oder mittels einer entsprechenden digitalen Schaltung weiterverarbeitet. Die Beobachtung des Specklemusters auf einem Monitor erleichtert die Justage des Meßaufbaus.

Beispiele für Specklebilder der beschriebenen Art sind in **Fig. 3a bis 3d** für einen polierten Silizium-Wafer mit  $R_a < 10 \text{ nm}$  (**Fig. 3a**) sowie für geschliffene metallische Oberflächen (Vergleichsmuster), deren Rauheit durch  $R_a \approx 25 \text{ nm}$  (**Fig. 3b**),  $R_a \approx 50 \text{ nm}$  (**Fig. 3c**) und  $R_a \approx 100 \text{ nm}$  (**Fig. 3d**) charakterisiert wird, dargestellt.

Im weiteren werden mittels Datenverarbeitungsprogrammen ein- oder zweidimensionale normierte Autokorrelationsfunktionen der Intensitätsschwankungen des Graustufenbildes gebildet und deren charakteristische Breiten ermittelt und zur Senkrechtkenngröße der Rauheit in Beziehung gesetzt. **Fig. 4a bis 4d** gibt die zu **Fig. 3a bis 3d** gehörenden, auf den Maximalwert eins normierten zweidimensionalen Autokorrelationsfunktionen (AKFs) wieder.

Die wiederholte, unter Umständen automatische Bilddatenerfassung und -auswertung während einer kontinuierlichen Bewegung der rauen Oberfläche stellt eine Realisierungsform des erfindungsgemäßen Meßverfahrens dar, die die Voraussetzungen bietet, regelnd in den Produktionsablauf eingreifen zu können.

this page blank (uspio)

## Patentansprüche

1. Meßverfahren und Vorrichtung zum Charakterisieren technischer Oberflächen bezüglich der Rauheit mit einer räumlich partiell kohärenten Beleuchtung eines Oberflächenabschnitts (6) dieser rauhen Oberfläche mittels des aus der räumlich partiell kohärenten Beleuchtung resultierenden Specklemusters, mit einem zeilenförmigen oder flächigen Detektorarray (8), das das in der Beobachtungsebene entstehende gestreute Specklemuster empfängt und dessen Struktur auflöst, mit einem Datenspeicher (10), in dem das Specklemuster zur digitalen Auswertung als Graustufenbild abgelegt wird, und mit einem Digitalrechner oder einer digitalen Auswerteschaltung (11) für die digitale Auswertung der im Datenspeicher abgelegten Graustufen-  
daten. 5 10 15
2. Meßvorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für die im Datenspeicher abgelegten Graustufen-  
daten eindimensionale oder zweidimensionale normierte Autokorrelationsfunktionen der Graustufenfluktuationen gebildet werden, aus denen ein Maß für eine Senkrechtkenngröße der Rauheit der zu untersuchenden Oberfläche abgeleitet wird. 20
3. Meßvorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß auf einheitliche Art und Weise für die im Datenspeicher abgelegte Graustufenzeile oder für das Graustufenbild des Specklemusters eine charakteristische Breite der zugehörigen ein- oder zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion bestimmt wird, aus der ein Maß für eine Senkrechtkenngröße der Rauheit der zu untersuchenden Oberfläche ermittelt wird. 25 30
4. Meßvorrichtung nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß Dejustierungen der optischen Komponenten der Meßanordnung in bezug auf die zu untersuchende Oberfläche durch eine entsprechende Variation des Bereiches des Specklemusters, für den Werte der Autokorrelationsfunktion bestimmt werden, kompensiert werden. 35 40
5. Meßvorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß im Falle einer anisotrop rauhen Oberfläche die Oberflächenrauheit durch die minimale charakteristische Breite der eindimensionalen Autokorrelationsfunktionen für verschiedene Richtungen im Specklemuster, die der Breite in Richtung maximaler Rauheit entspricht, oder durch die charakteristische Breite einer zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion in Richtung der Rauheitsvorzugsrichtung beschrieben wird. 45 50
6. Meßvorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Specklemuster einer anisotrop rauhen Oberfläche durch zweidimensionale Autokorrelationsfunktionen analysiert wird, die für Richtungen größerer Rauheit eine geringere charakteristische Breite zeigen und bei denen sich für Richtungen geringerer Oberflächenrauheit eine dementsprechend größere charakteristische Breite ergibt. 55

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---